

А. И. МАЦЕГОРА, О. П. АРСЕНЬЕВА, П. А. КАПУСТЕНКО, В. В. ЗОРЕНКО, Л. В. СОЛОВЕЙ

ОБОБЩЕННАЯ МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ ЗАГРЯЗНЕНИЙ ПОВЕРХНОСТИ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ В БЕЗРАЗМЕРНОЙ ФОРМЕ И ЕЕ ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ РАСЧЕТА ПЛАСТИНЧАТОГО ТЕПЛООБМЕННИКА

Разработана обобщенная математическая модель формирования загрязнений на поверхности теплопередачи пластинчатого теплообменника. Модель представлена системой обыкновенных дифференциальных уравнений и учитывает распределение параметров процесса вдоль канала пластинчатого теплообменника, что позволяет прогнозировать развитие загрязнения во времени в разных местах вдоль длины канала. Модель представлена в безразмерной форме, что позволяет расширить диапазон ее применения на более широкий класс явлений загрязнения теплопередающих поверхностей в условиях, когда интенсивность процесса контролируется массопереносом в основном потоке и скоростью реакции на границе раздела жидкой и твердой фаз. Применение предложенной модели формирования загрязнений позволило разработать математическую модель формирования загрязнений в каналах пластинчатого теплообменника с учетом изменения основных параметров процесса вдоль поверхности теплопередачи. Для проверки полученной модели и определения входящих в нее безразмерных параметров планируется проведение расчетов для конкретных условий и сравнение с данными экспериментальных исследований и промышленных испытаний пластинчатых теплообменников при работе со средами, склонными к образованию загрязнений на теплопередающей поверхности.

Ключевые слова: математическая модель, пластинчатый теплообменник, поверхность теплопередачи, загрязнение поверхности теплопередачи.

О. І. МАЦЕГОРА, О. П. АРСЕНЬЕВА, П. О. КАПУСТЕНКО, В. В. ЗОРЕНКО, Л. В. СОЛОВЕЙ УЗАГАЛЬНЮЮЧА МОДЕЛЬ ФОРМУВАННЯ ВІДКЛАДЕНЬ НА ПОВЕРХНІ ТЕПЛОПЕРЕДАЧІ У БЕЗРОЗМІРНОЇ ФОРМІ ТА ЇЇ ВПРОВАДЖЕННЯ ДЛЯ РОЗРАХУНКУ ПЛАСТИНЧАТОГО ТЕПЛООБМІННИКА

Розроблена узагальнена математична модель формування забруднень на поверхні теплопередачі пластинчатого теплообмінника. Модель представлена системою звичайних диференціальних рівнянь і враховує розподіл параметрів процесу вздовж каналу пластинчатого теплообмінника, що дозволяє прогнозувати розвиток забруднення у часі в різних місцях продовж довжини каналу. Модель представлена в безрозмірній формі, що дозволяє розширити діапазон її використання на більш широкий клас явищ забруднень теплопередаючих поверхонь в умовах, коли інтенсивність процесу контролюється масопереносом в основному потоці і швидкістю реакції на межі розділу рідкої та твердої фаз. Використання представленої моделі формування забруднень дозволило розробити математичну модель формування забруднень в каналах пластинчатого теплообмінника з урахуванням змін основних параметрів процесу вздовж поверхні теплопередачі. Для перевірки отриманої моделі і визначення присутніх в ній безрозмірних параметрів планується проведення розрахунків для конкретних умов та порівняння з даними експериментальних досліджень в промислових випробуваннях пластинчатих теплообмінників при роботі з середовищами, схильними до утворення забруднень на теплопередаючій поверхні.

Ключові слова: математична модель, пластинчатий теплообмінник, поверхня теплопередачі, забруднення поверхні теплопередачі.

О. І. MATSEGORA, O. P. ARSENYEVA, P. O. KAPUSTENKO, V. V. ZORENKO, L. V. SOLOVEY A GENERALIZED MATHEMATICAL MODEL OF THE FOULING FORMATION ON THE HEAT TRANSFER SURFACE IN NON-DIMENSIONAL VIEW AND ITS APPLICATION FOR PLATE HEAT EXCHANGERS DESIGN

A generalized mathematical model of the formation of fouling on the heat transfer surface of a plate heat exchanger has been developed. The model is presented by a system of ordinary differential equations and takes into account the distribution of process parameters along the channel of a plate heat exchanger, which allows predicting the development of contamination in time in different places along the channel length. The model is presented in a dimensionless form, which allows extending the range of its application to a wider class of phenomena of contamination of heat transfer surfaces under conditions where the intensity of the process is controlled by mass transfer in the main flow and the reaction rate at the interface between the liquid and solid phases. The application of the proposed fouling formation model made it possible to develop a mathematical model for the formation of fouling in the channels of a plate heat exchanger, taking into account changes in the main process parameters along the heat transfer surface. To check the obtained model and determine the dimensionless parameters that enter into it, it is planned to carry out calculations for specific conditions and compare it with experimental studies and industrial tests of plate heat exchangers when working with media prone to the formation of fouling on the heat transfer surface.

Keywords: mathematical model, plate heat exchanger, heat transfer, fouling on the heat transfer surface.

Введение. Одной из важных предпосылок для устойчивого развития человечества является эффективное использование ресурсов, среди которых энергия играет ведущую роль. Она генерируется в настоящее время в основном при сжигании ископаемого топлива, не только исчерпывая его ограниченные запасы, но также выделяя вредные продукты сгорания в окружающую среду (Товажнянский и др., 2002). Для эффективного использования энергии первостепенное значение имеет увеличение рекуперации тепла. Это возможно благодаря применению метода интеграции процессов

и энергосбережения с использованием эффективного теплообменного оборудования [1]. Пластинчатые теплообменники (ПТО) являются одним из современных эффективных типов компактных теплообменников [2]. Компактная конструкция, состоящая из пакета гофрированных пластин, отштампованных из тонкого листового металла, за счет интенсификации процесса теплообмена в каналах ПТО, позволяет значительно уменьшить

© Мацегора А.И., Арсеньева О.П., Капустенко П.А.,
Зоренко В.В., Соловей Л.В., 2018

площадь теплопередачи для эквивалентной нагрузки, по сравнению с кожухотрубчатými теплообменниками [3]. Каналы ПТО имеют небольшой эквивалентный диаметр и сложную геометрию, которая способствует увеличению коэффициентов теплопередачи за счет высокой турбулентности потока. Поэтому правильный учет загрязнения в ПТО имеет первостепенное значение, т.к. метод учета загрязнений, используемый при расчете кожухотрубчатого теплообменника, может привести к избыточной площади теплопередачи и более низким скоростям в каналах ПТО, за которыми следует резкое снижение теплопередачи и возможна блокировка сечения узких каналов ПТО [4].

Правильный учет загрязнения при расчете ПТО требует использования детальных математических моделей с применением достаточно точных моделей образования отложений. Как представлено в [5], для моделирования тепловых характеристик ПТО можно учитывать локальные параметры расчета отложений в каналах ПТО на базе одномерной модели. Однако, кроме тепловых характеристик ПТО, правильное прогнозирование падения давления и его развитие во времени очень важно для оценки эксплуатационных характеристик ПТО, составления графика технического обслуживания. Моделирование термогидравлического поведения кожухотрубчатого теплообменника нефтеперерабатывающего завода в условиях загрязнения поверхности теплопередачи было предложено в работе [6]. Представлен анализ некоторых моделей отложения загрязнений при влиянии скорости реакции на поверхности и массопереноса к поверхности из ядра потока. Анализ выполнен на основе уравнения предложенного Эпштейном для определения интенсивности осаждения отложений, которое согласно [7] выглядит следующим образом:

$$\varphi_d = \lambda_f \cdot C_b \cdot \left(k_1 \cdot k_m^{-1} + \mu^{-1} \cdot k_2 \cdot \tau_w \cdot e^{E/RT_s} \right)^{-1} \quad (1)$$

где λ_f – теплопроводность отложений, J/(м·К); μ – динамическая вязкость жидкости, Pa·с; τ_w – напряжение сдвига на стенке, Pa; E – энергия активации, J/mol; $R=8.314$ J/mol – универсальная газовая постоянная; T_s – температура поверхности слоя отложений, К; k_m – коэффициент массопереноса, м/с; k_1 и k_2 – размерные константы; C_b – концентрация прекурсоров отложения, mol/m³.

Модели отложений, основанные на уравнении (1), демонстрируют хорошие результаты в сопоставлении экспериментальных данных о загрязнении на интенсифицированных поверхностях теплопередачи. Это показано в работе [8] для отложений при движении сырой нефти в трубах с интенсифицирующими вставками и в [9] для отложений при течении воды в каналах ПТО. Однако представление модели загрязнений в этих работах в размерной форме требует получения эмпирических коэффициентов сложных размерностей и ставит под вопрос обобщающую способность модели. Целью настоящей работы является приведение модели

отложений к безразмерной форме и разработка на ее основе математической модели пластинчатого теплообменника, учитывающей изменение локальных параметров протекающих процессов.

2. Модель формирования загрязнений.

Основной проблемой моделирования ПТО в условиях образования отложений является выбор надежной и достаточно точной модели загрязнения. Как было показано в [10] хорошие результаты по термическому моделированию загрязнения в воде в ПТО могут быть достигнуты с использованием подхода Керна и Ситона, где скорость образования отложения описывается как разница между интенсивностью осаждения отложений φ_d и интенсивностью удаления отложений φ_{rm} :

$$\partial \delta_f / \partial \theta = \varphi_d - \varphi_{rm} \quad (2)$$

Выражение для расчета интенсивности отложения загрязнений в данной работе получено с использованием уравнения (1). При этом это уравнение представлено в безразмерной форме, путем введения безразмерных комплексов при следующих допущениях:

1. Существует аналогия между тепло и массопереносом и для расчета диффузионного числа Нуссельта может быть использовано выражение:

$$Nu_{D2} = k_m \cdot d_e / D = Nu_2 \cdot (Pr_{D2}/Pr_2)^{1/3}, \quad (3)$$

где Nu_2 – тепловое число Нуссельта для теплоотдачи при движении жидкости в рассматриваемом канале; $Pr_2 = c_{p2} \mu_2 / \lambda_2$ – число Прандтля; $Pr_D = D \rho_2 / \mu_2$ – диффузионное число Прандтля; ρ_2 – плотность жидкости, кг/м³; λ_2 – теплопроводность жидкости, J/(м·К); c_{p2} – удельная теплоемкость жидкости, J/(кг·К); d_e – эквивалентный диаметр канала, м; D – коэффициент диффузии, м/с.

2. Связь между коэффициентом диффузии для конкретных веществ может быть определена с помощью модификации уравнения Стокса-Эйнштейна [11] в следующем виде:

$$D = \chi \cdot T_s \cdot k_B / (\mu_2 \cdot r_m), \quad (4)$$

где $k_B = 1.38048 \cdot 10^{-23}$ J/K – постоянная Больцмана; T_s – температура поверхности осаждения, К; μ – динамическая вязкость, Pa·с; r_m – радиус молекулы Ван-дер-Ваальса, м, который вводится как масштаб для радиуса молекулы; χ – параметр, зависящий от природы веществ раствора, который учитывает радиус молекулы растворенного вещества и отклонения от уравнения Стокса-Эйнштейна для конкретного содержания раствора. Такой характер связи между D , μ и T был экспериментально подтвержден в [12] для разных растворов в экспериментах по установлению зависимости коэффициента пропорциональности от свойств растворенного вещества. Тот же вывод следует из более поздних работ, например, Карунанити и Богашваран [13]. Можно заключить, что для конкретного раствора параметр χ можно считать не меняющимся с концентрацией и температурой раствора. Поскольку радиус молекулы для разных

сред различен и зачастую трудно определяем, в расчетах принят радиус молекулы воды $r_m = 1,36 \cdot 10^{-10}$ м в соответствии с данными [14]. Он вводится как коэффициент масштабирования, а различия в r_m для различных сред учитываются в параметре χ . Используя уравнения (3) и (4), после подстановки в уравнение (1) можно записать в безразмерной форме:

$$\varphi_a \cdot d_e \cdot \rho_2 / \mu_2 = \left\{ c_D \cdot K_D^{2/3} \cdot Pr_2^{1/3} / Nu_2 + c_R \cdot K_R \cdot \exp[E / (R \cdot T_s)] \right\}^{-1} \quad (5)$$

Здесь K_D и K_R - безразмерные комплексы переменных, значения которых могут изменяться с изменением температуры и свойств потока. Эти комплексы выражаются следующим образом:

$$K_D = \mu_2^2 \cdot r_m / (T_s \cdot \rho_2 \cdot k_B); K_R = \tau_w / (\rho_2 \cdot d_e \cdot g). \quad (6)$$

Другими двумя безразмерными комплексами c_D и c_R являются:

$$c_D = k_1 / (\chi^{2/3} \cdot C_b \cdot \lambda_f); c_R = (k_2 \cdot g) / (C_b \cdot \lambda_f). \quad (7)$$

Эти комплексы зависят только от констант k_1 и k_2 в уравнении (1) и переменных, которые не изменяются для одного и того же раствора. Для экспериментов с теми же средами и типами отложения c_D и c_R можно рассматривать как константы и определять путем обработки данных экспериментальных исследований или промышленных испытаний.

Интенсивность удаления отложений в безразмерной форме может быть выражена с использованием размерного параметра B :

$$\varphi_m \cdot d_e \cdot \rho_2 / \mu_2 = B \cdot \delta_f \cdot \tau_w \cdot d_e \cdot \rho_2 / \mu_2 = c_m \cdot \delta_f \cdot Re^* \cdot Pr_2 / d_e \quad (8)$$

Здесь Re^* - число Рейнольдса, рассчитанное по скорости напряжения сдвига на стенке:

$$Re^* = \sqrt{\tau_w / \rho_2} \cdot d_e \cdot \rho_2 / \mu_2; c_m = B \cdot \lambda_2 / c_{p2} \quad (9)$$

Считая, что для одной и той же жидкости изменение c_{p2} и λ_2 сравнительно мало, параметр c_m можно считать постоянным при сопоставлении экспериментальных данных о загрязнении для конкретной среды.

Математическая модель тепловых характеристик ПТО в условиях загрязнений была представлена в [15] с использованием размерной модели загрязнений. Представленная в данной главе безразмерная модель загрязнений требует экспериментальной проверки и необходимой дополнительной модификации математической модели, включающей также расчет гидравлического режима ПТО.

3. Математическая модель пластинчатого теплообменника в условиях загрязнения поверхности теплопередачи. Основными дифференциальными уравнениями теплового расчета для противоточного теплообменника являются уравнения:

$$\partial T_2 / \partial x = q \cdot \Pi / (g_2 \cdot c_{p2}) \quad (10)$$

$$\partial T_1 / \partial x = (\partial T_2 / \partial x) \cdot g_2 \cdot c_{p2} / (g_1 \cdot c_{p1}) \quad (11)$$

где T_1 и T_2 - температуры горячего и холодного потоков, К; g_1 и g_2 - массовые потоки горячего и холодного теплоносителей по одному каналу, кг/с; c_{p1} и c_{p2} - удельные теплоемкости горячего и холодного потоков, J/(кг·К); Π - периметр канала, м; x - расстояние от входа холодного потока, м; q - удельный тепловой поток, Вт/м².

$$q = (1/h_1 + 1/h_2 + R_f + \delta_w / \lambda_w)^{-1} \times (T_1 - T_2) \quad (12)$$

Здесь δ_w - толщина металла пластины, м; λ_w - теплопроводность металла пластины W/(м·К); h_1 и h_2 - коэффициенты теплоотдачи для горячего и холодного потоков, соответственно, W/(м²·К).

Температура на внешней поверхности слоя загрязнений:

$$T_s = \left[(1/h_1 + 1/h_2 + R_f + \delta_w / \lambda_w) \times h_2 \right]^{-1} \times (T_1 - T_2) + T_2 \quad (13)$$

Коэффициенты теплоотдачи h_1 и h_2 вычисляются в соответствии с корреляционными уравнениями, представленными в [16] для перепада давления и теплообмена в основном гофрированном поле в зависимости от геометрии канала и теплофизических свойств жидкости. В общем виде:

$$h_j = h_j(W_j, T_j, T_s, \beta, \gamma, d_{ej}) \quad (14)$$

Здесь $\gamma = 2b/S$ - отношение удвоенной высоты к шагу гофры; β - угол гофрировки, градусы. При образовании отложения площадь свободного поперечного сечения канала (f_{ch} , м²) становится все меньше, увеличивая скорость потока, которая может быть определена следующим образом:

$$W_2 = \frac{g_2}{(f_{ch} - \delta_f \cdot \Pi) \cdot \rho_2} \quad (15)$$

Как указано в [6], осадженный слой отложений приводит к увеличению потерь давления в канале, что не только вызывает рост скорости потока, но и создает шероховатость на границе потока. Для большинства потоков в теплообменниках теплофизические свойства мало зависят от изменения давления внутри каналов (особенно для жидкостей). По этой причине тепловая часть математической модели может быть решена без учета потери давления в канале, что позволяет получать информацию о развитии слоя загрязнения перед последующим вычислением потерь давления.

Потери давления в ПТО можно рассматривать как сумму потерь давления в основном гофрированном поле ΔP_{mf} на входных и выходных распределительных участках ΔP_{zin} и ΔP_{zout} и в коллекторах ΔP_{pc} [17]. Полная потеря давления с выражениями для соответствующих составных частей выглядит следующим образом:

$$\Delta P_2 = \int_0^{L_p} \zeta_2 \cdot \frac{\rho_2 \cdot W_2^2}{2 \cdot d_e} dx + \zeta_{Zin} \cdot \frac{\rho_2 \cdot W_{2in}^2}{2} + \zeta_{Zout} \cdot \frac{\rho_2 \cdot W_{2out}^2}{2} + 1.3 \cdot \frac{\rho_2 \cdot W_{2p}^2}{2} \quad (16)$$

где W_{2in} , W_{2out} и W_{2p} - скорости на входе, выходе и портах канала, м/с; ζ_2 - коэффициент трения в канале ПТО, определяемый в зависимости от геометрии канала по формуле (17), предложенной в [18] с термином «А» учитывающим шероховатость, создаваемую загрязнением:

$$\zeta_2 = 8 \left\{ \left(\frac{12 + p_2}{Re} \right)^{12} + \left[A + \left(\frac{37530 p_1}{Re} \right)^{16} \right]^{\frac{3}{2}} \right\}^{\frac{1}{12}}; \quad (17)$$

$$A = \left[p_4 \cdot \ln \left(p_5 \cdot \left(\left(\frac{7 \cdot p_3}{Re} \right)^{0.9} + 0.27 \cdot \frac{\delta_f}{d_e} \right)^{-1} \right) \right]^{16}$$

$$p_1 = \exp(-0.157 \cdot \beta); p_2 = \pi \cdot \beta \cdot \gamma^2 / 3; p_3 = \exp(-\pi \cdot \beta / (180 \cdot \gamma^2)); p_5 = 1 + \frac{1}{10};$$

$$p_4 = \left(0.061 + (0.69 + \lg(\beta \cdot \pi / 180))^{-2.63} \right) \cdot (1 + (1 - \gamma) \cdot 0.9 \cdot \beta^{0.01}) \quad (18)$$

Коэффициент локального гидравлического сопротивления во входном распределительном участке определяется согласно данным из работы [19], а именно $\zeta_2 = 38$. Для выходного распределительного участка к значению 38 применяется поправка на шероховатость загрязнения, принятая как коэффициент трения в конце основного гофрированного поля, а также вычисляется скорость W_{2out} для площади поперечного сечения, уменьшенной за счет загрязнения.

Уравнения (2)–(18) с уравнениями для расчета температурных зависимостей, тепловых и физических свойств потоков и геометрических соотношений для ПТО представляют собой систему обыкновенных дифференциальных уравнений с нелинейными правыми частями.

Список литературы:

1. Капустенко П.А., Кузин А.К., Макаровский Е.Л., Товажнянский Л.Л., Ульев Л.М., Черная Е.Б., 2004. Альтернативная энергетика и энергосбережение: современное состояние и перспективы. ООО Издательский дом «Вокруг цвета», Харьков, Украина.
2. Klemes J.J., Arsenyeva O., Kapustenko P., Tovazhnyansky L., 2015. Compact Heat Exchangers for Energy Transfer Intensification: Low Grade Heat and Fouling Mitigation. CRC Press, Boca Raton, FL, USA.
3. Kapustenko P., Boldyryev S., Arsenyeva O., Khavin G. The use of plate heat exchangers to improve energy efficiency in phosphoric acid production. Journal of Cleaner Production, 2009, 17(10), – pp. 951–958.
4. Gogenko A.L., Anipko O.B., Arsenyeva O.P., Kapustenko P.O. Accounting for fouling in plate heat exchanger design. Chemical Engineering Transactions, 2007, 12, – pp. 207–212.
5. Kapustenko P., Arsenyeva O., Matsegora O., Kusakov S., Tovazhnyansky V. The mathematical modelling of fouling formation along PHE heat transfer surface, Chemical Engineering Transactions, 2017, 61, – pp. 247–252.
6. Yeap B.L., Wilson D.I., Polley G.T., Pugh S.J. Mitigation of crude oil refinery heat exchanger fouling through retrofits based on thermo-hydraulic fouling models. Chemical Engineering Research and Design, 2004, 82(1), – pp. 53–71.

Численное решение этой системы методом конечных разностей реализовано для ПК с использованием программного обеспечения Mathcad. Для проверки обоснованности разработанной модели в следующей статье будут рассмотрены конкретные примеры ее практического применения.

4. Заключение.

Предложена обобщенная модель формирования загрязнений на поверхности теплопередачи теплообменных аппаратов. Модель представлена в безразмерной форме, что позволяет расширить диапазон ее применения на более широкий класс явлений загрязнения теплопередающих поверхностей в условиях, когда интенсивность процесса контролируется массопереносом в основном потоке и скоростью реакции на границе раздела жидкой и твердой фаз.

Применение предложенной модели формирования загрязнений позволило разработать математическую модель формирования загрязнений в каналах пластинчатого теплообменника с учетом изменения основных параметров процесса вдоль поверхности теплопередачи.

Для проверки полученных моделей и определения входящих в них безразмерных параметров планируется проведение расчетов для конкретных условий и сравнение с данными экспериментальных исследований и промышленных испытаний пластинчатых теплообменников при работе со средами склонными к образованию загрязнений на теплопередающей поверхности.

7. Epstein N., 2011. Comments on «Relate Crude Oil Fouling Research to Field Fouling Observations by Joshi et al.». In Proc. International Conference on Heat Exchanger Fouling and Cleaning, 2011, – pp. 62–64.
8. Yang M., Crittenden B. Fouling thresholds in bare tubes and tubes fitted with inserts, Applied Energy, 2012, 89, – pp. 67–73.
9. Arsenyeva O.P., Crittenden B., Yang M., Kapustenko P.O. Accounting for the thermal resistance of cooling water fouling in plate heat exchangers. Applied Thermal Engineering, 2013, 61(1), – 53–59.
10. Demirskiy O.V., Kapustenko P.O., Arsenyeva O.P., Matsegora O.I., Pugach Y.A. Prediction of fouling tendency in PHE by data of on-site monitoring. Case study at sugar factory. Applied Thermal Engineering, 2018, 128, – pp. 1074–1081.
11. Einstein A. Investigation on the Theory of the Brownian Movement. Annalen der Physik, 1906, (4) 19, – pp. 371–381.
12. Wilke C.R., Chang P. Correlation of diffusion coefficients in dilute solutions. AIChE J, 1955, 1(2), – pp. 264–270.
13. Karunanithi B., Bogeshwaran K. Liquid Diffusion-Measurement and Correlation of Diffusion Coefficient in Acetic acid-Carbon tetra chloride System. International Journal of ChemTech Research, 2016, 9(08), – pp. 465–478.
14. Zhang Y., Xu Z. Atomic radii of noble gas elements in condensed phases. American Mineralogist, 1995, 80(7–8), 670–675.

15. Kapustenko P., Arsenyeva O., Matsegora O., Kusakov S., Tovazhnianskiy V. The mathematical modelling of fouling formation along PHE heat transfer surface, Chemical Engineering Transactions, 2017, 61, – pp. 247–252.
16. Kapustenko P., Arsenyeva O., Dolgonosova O. The heat and momentum transfers relation in channels of plate heat exchangers, Chemical Engineering Transactions, 2011, 25, – pp. 357–362.
17. Arsenyeva O., Kapustenko P., Tovazhnyanskyy L., Khavin G. The influence of plate corrugations geometry on plate heat exchanger performance in specified process conditions. Energy, 2013, 57, – pp. 201–207.
18. Arsenyeva O.P., Tovazhnyanskyy L.L., Kapustenko P.O., Khavin G.L. The Generalized Correlation for Friction Factor in Criss-cross Flow Channels of Plate Heat Exchangers, Chemical Engineering Transactions, 2011, 25, – pp. 399–404.
- Proc. International Conference on Heat Exchanger Fouling and Cleaning, 2011, – pp. 62–64.
8. Yang M., Crittenden B. Fouling thresholds in bare tubes and tubes fitted with inserts, Applied Energy, 2012, 89, – pp. 67–73.
9. Arsenyeva O.P., Crittenden B., Yang M., Kapustenko P.O. Accounting for the thermal resistance of cooling water fouling in plate heat exchangers. Applied Thermal Engineering, 2013, 61(1), – 53–59.
10. Demirskiy O.V., Kapustenko P.O., Arsenyeva O.P., Matsegora O.I., Pugach Y.A. Prediction of fouling tendency in PHE by data of on-site monitoring. Case study at sugar factory. Applied Thermal Engineering, 2018, 128, – pp. 1074–1081.
11. Einstein A. Investigation on the Theory of the Brownian Movement. Annalen der Physik, 1906, (4) 19, – pp. 371–381.
12. Wilke C.R., Chang P. Correlation of diffusion coefficients in dilute solutions. AIChE J, 1955, 1(2), – pp. 264–270.
13. Karunanithi B., Bogeshwaran K. Liquid Diffusion-Measurement and Correlation of Diffusion Coefficient in Acetic acid-Carbon tetra chloride System. International Journal of ChemTech Research, 2016, 9(08), – pp. 465–478.
14. Zhang Y., Xu Z. Atomic radii of noble gas elements in condensed phases. American Mineralogist, 1995, 80(7–8), 670–675.
15. Kapustenko P., Arsenyeva O., Matsegora O., Kusakov S., Tovazhnianskiy V. The mathematical modelling of fouling formation along PHE heat transfer surface, Chemical Engineering Transactions, 2017, 61, – pp. 247–252.
16. Kapustenko P., Arsenyeva O., Dolgonosova O. The heat and momentum transfers relation in channels of plate heat exchangers, Chemical Engineering Transactions, 2011, 25, – pp. 357–362.
17. Arsenyeva O., Kapustenko P., Tovazhnyanskyy L., Khavin G. The influence of plate corrugations geometry on plate heat exchanger performance in specified process conditions. Energy, 2013, 57, – pp. 201–207.
18. Arsenyeva O.P., Tovazhnyanskyy L.L., Kapustenko P.O., Khavin G.L. The Generalized Correlation for Friction Factor in Criss-cross Flow Channels of Plate Heat Exchangers, Chemical Engineering Transactions, 2011, 25, – pp. 399–404.

Bibliography (transliterated):

1. Kapustenko P.O., Kuzin A.K., Makarovskiy E.L., Tovazhnianskij L.L., Ulyev L.M., Chernaya E.B. (2004). Alternativnaya energetika I energobezbezheniye: sovremennoe sostoyaniye i perspektivy. OOO Publisher «Around the world», Kharkiv, Ukraine.
2. Klemes J.J., Arsenyeva O., Kapustenko P., Tovazhnyanskyy L., 2015. Compact Heat Exchangers for Energy Transfer Intensification: Low Grade Heat and Fouling Mitigation. CRC Press, Boca Raton, FL, USA.
3. Kapustenko P., Boldyryev S., Arsenyeva O., Khavin G. The use of plate heat exchangers to improve energy efficiency in phosphoric acid production. Journal of Cleaner Production, 2009, 17(10), – pp. 951–958.
4. Gogenko A.L., Anipko O.B., Arsenyeva O.P., Kapustenko P.O. Accounting for fouling in plate heat exchanger design. Chemical Engineering Transactions, 2007, 12, – pp. 207–212.
5. Kapustenko P., Arsenyeva O., Matsegora O., Kusakov S., Tovazhnianskiy V. The mathematical modelling of fouling formation along PHE heat transfer surface, Chemical Engineering Transactions, 2017, 61, – pp. 247–252.
6. Yeap B.L., Wilson D.I., Polley G.T., Pugh S.J. Mitigation of crude oil refinery heat exchanger fouling through retrofits based on thermo-hydraulic fouling models. Chemical Engineering Research and Design, 2004, 82(1), – pp. 53–71.
7. Epstein N., 2011. Comments on «Relate Crude Oil Fouling Research to Field Fouling Observations by Joshi et al.». In

Поступила (received) 29.10.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Мацегора Олександр Іванович (Мацегора Александр Иванович, Matsegora Oleksandr Ivanovych) – аспірант кафедри інтегрованих технологій, процесів та апаратів, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», e-mail: aleksandr.matsegora@ukr.net; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5482-0341>

Арсеньєва Ольга Петрівна (Арсеньєва Ольга Петровна, Arsenyeva Olga. Petrovna) – доктор технічних наук, професор кафедри інтегрованих технологій, процесів та апаратів, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», e-mail: ol.arsenyeva@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9013-6451>

Капустенко Петро Олексійович (Капустенко Петр Алексеевич, Kapustenko Petro Oleksiyovych) – кандидат технічних наук, професор кафедри інтегрованих технологій, процесів та апаратів, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; e-mail: kap@kpi.kharkov.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3550-5274>

Зоренко Віктор Володимирович (Зоренко Владимирович, Zorenko Victor Volodymyrovych) – аспірант кафедри інтегрованих технологій, процесів та апаратів, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», e-mail: 629945@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8363-8488>

Соловей Людмила Валентинівна (Соловей Людмила Валентиновна, Solovey Ludmila Valentinivna) – викладач кафедри інтегрованих технологій, процесів та апаратів, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5308-6782>; e-mail: ludsol@ukr.net.